

一种基于网络密度分簇的移动信标辅助定位方法

赵方^① 马严^① 罗海勇^② 林权^③ 林琳^①

^①(北京邮电大学软件学院网络技术研究院 北京 100876)

^②(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

^③(北京航空航天大学软件学院 北京 100083)

摘要: 现有移动信标辅助定位算法未充分利用网络节点分布信息, 存在移动路径过长及信标利用率较低等问题。该文把网络节点分簇、增量定位与移动信标辅助相结合, 提出了一种基于网络密度分簇的移动信标辅助定位算法(MBL(ndc))。该算法选择核心密度较大的节点作簇头, 采用基于密度可达性的分簇机制把整个网络划分为多个簇内密度相等的簇, 并联合使用基于遗传算法的簇头全局路径规划和基于正六边形的簇内局部路径规划方法, 得到信标的优化移动路径。当簇头及附近节点完成定位后, 升级为信标, 采用增量定位方式参与网络其它节点的定位。仿真结果表明, 该算法定位精度与基于 HILBERT 路径的移动信标辅助定位算法相当, 而路径长度不到后者的 50%。

关键词: 无线传感器网络; 移动信标辅助定位; 基于密度分簇; 增量定位

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-2988-05

A Mobile Beacon-assisted Node Localization Algorithm Using Network-Density-based Clustering for Wireless Sensor Networks

Zhao Fang^① Ma Yan^① Luo Hai-yong^② Lin Quan^③ Lin Lin^①

^①(School of Software Engineering, Researching Academy of Network Technology, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

^②(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^③(School of Software Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: All the current mobile beacon-assisted localization algorithms do not make full use of the practical node distribution information and let the mobile landmark travel the entire network, which causes large path length and low beacon utilization ratio. A novel mobile beacon-assisted node localization algorithm using network-density-based clustering (MBL(ndc)) for wireless sensor networks is presented, which combines node clustering, incremental localization and mobile beacon assisting together. It first selects the cluster heads that has highest core density, and then employs density-reachable method to cluster the network into several branches with the same density, and lastly obtains the optimum trajectory of mobile beacon by combining cluster head path planning using genetic algorithm with in-cluster path planning using hexagon trajectory. After the cluster heads and nearby nodes have completed localization, they become beacons, then cooperate with each other to localize the left unknown nodes in an incremental way. Simulation results demonstrate that the proposed MBL(ndc) algorithm offers comparable localization accuracy as the mobile beacon-assisted localization algorithm with HILBERT trajectory, but with less than 50% path length of the later.

Key words: Wireless sensor networks; Mobile beacon-assisted localization; Density-based clustering; Incremental localization

1 引言

近年来, 在对无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)节点进行定位时, 为减少信标部署成本和定位能耗, 人们提出了移动信标(mobile

beacon)辅助定位方法^[1]。由于该方法的开销主要集中在移动信标上, 信标移动路径成为优化目标。

目前大部分移动信标辅助定位算法^[1-5]并未给出具体的移动信标路径, 文献[6-8]尽管给出了信标移动路径, 但均要求移动信标在所有规划位置发射的信号能多重全覆盖整个网络, 存在信标移动及发射开销较大、信标利用率较低和定位时间较长等问题, 尤其是当网络规模较大、网络节点密度分布不

2008-11-24 收到, 2009-09-10 改回

国家高技术研究发展计划(2006AA10Z253, 2007AA12Z321, 2009AA011902)和国家自然科学基金(60873244, 60772111, 60973110)资助课题

均或待定位节点移动时,上述问题表现得尤为突出。

不同于上述移动信标发射信号多重覆盖整个网络的路径规划策略以及所有待定位节点单纯依赖于移动信标的定位方法,本文利用网络节点分布信息,把网络分簇、移动信标辅助和增量定位方法相结合,提出了一种基于网络密度分簇的移动信标辅助定位算法(Mobile Beacon-assisted node Localization algorithm using network-density-based clustering, MBL(ndc))。该算法既能实现节点高精度定位,同时可降低信标移动及发射开销,提高信标使用效率。

2 基于网络密度分簇的移动信标辅助定位算法

基于网络密度分簇的移动信标辅助定位算法 MBL(ndc)主要包括以下步骤:

(1)首先执行基于核心密度的簇头选择,然后采用改进的 DBSCAN(Density Based Spatial Clustering of Application with Noise)算法^[9]进行网络节点分簇;

(2)构建移动信标、所有簇头间的测距矩阵,使用 MDS-MAP(C)^[10]算法确定簇头的初始绝对坐标;

(3)联合使用簇头全局路径规划和簇内路径规划方法,确定信标在整个网络内的优化移动路径;

(4)信标按规划好的路径移动,在规划好的地理位置发射包含自身位置信息的数据包;

(5)待定位节点接收信标信息,使用 3 边或多边定位算法实现自定位,并升级为信标,参与下一轮其它待定位节点定位,该增量定位过程一直迭代计算到所有节点完成定位或达到规定迭代次数为止。

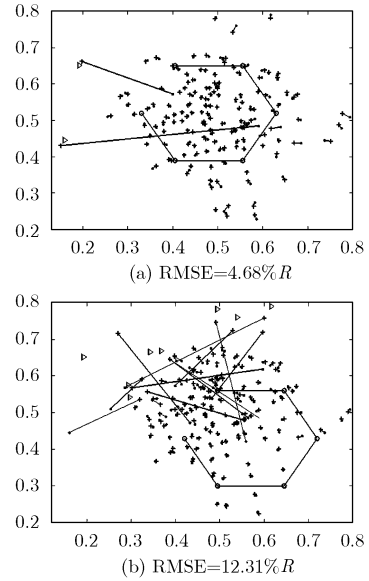
上述步骤中网络分簇和路径规划是 MBL(ndc)算法的关键,下面详细介绍这两个步骤。

2.1 基于网络密度的分簇算法

2.1.1 簇头最优位置选择 使用增量式定位方法进行定位时,控制增量定位迭代过程由网络高密度区域向低密度区域扩散,可有效抑制定位误差的扩散。

图 1 所示实验验证了该结论。图 1(a)中较多的节点处于正六边形内,可直接获得多个精确的信标位置信息,实现高精度定位。由于真实信标位置比使用增量定位方法升级为信标的节点位置更准确,因此可减少定位误差的累积效应。此外,让高密度区域的节点先实现定位,将有更多的节点可升级为信标,能较好地避免信标共线现象。在图 1(b)中,由于正六边形偏离网络高密度区,直接接收到多个移动信标位置信息的节点数目相对较少,更多的节点需要使用增量定位方法完成定位,导致定位误差增加。

基于上述结论,本文采用如下增量定位思想:首先选择簇内密度最高的节点作簇头,移动信标对



(图中“.”点为实际位置,“+”为位置估计,“△”为不能实现定位节点,正六边形顶点“o”为移动信标发射位置)

图 1 信标部署在不同密度位置对增量定位算法性能的影响

所有簇头及其局部区域进行多重覆盖,实现簇头及其附近区域节点的高精度定位并升级为信标,然后采用增量定位方式,由高密度簇中心区域往低密度方向扩散,完成其它节点定位。

2.1.2 分簇算法 基于无线传感器网络特点,本文对空间数据点分类算法 DBSCAN^[9]进行改进,并应用于节点分簇,把均匀或不规则的网络划分为本地密度相近、较整体密度高、非重叠的多个簇^[11]。

本文对 DBSCAN 算法的改进主要是基于节点核心密度的簇头选择机制。该簇头选择机制既能保证簇内节点间密度可达,而且还能保证簇头位于簇内密度最大处。当使用增量方法定位时,该分簇机制可保证节点定位由高密度区域扩散而来,避免增量定位由节点稀疏区域扩散引入较大的定位误差。

为选择簇内核心密度最大节点作簇头,本文定义式(1)所示的节点权值计算方法,其中 D_r 表示能与节点 i 直接通信的节点数。参数 α 定义如式(2)所示,用于确定节点 i 的核心密度区域,式中 $N_{r_i}()$ 为节点 i 直接邻居的有序集合,它根据邻居节点距离节点 i 由近到远的顺序进行排序。参数 C_{dr} 为围绕节点 i 的核心节点数阈值,可根据网络节点密度情况进行调整。 $N_{r_i}(C_{dr})$ 为距离节点 i 第 C_{dr} 近邻居, $d(i, N_{r_i}(C_{dr}))$ 为节点 i 与第 C_{dr} 近邻居间的距离。

$$\omega = D_r / \alpha \tag{1}$$

$$\alpha = \begin{cases} d(i, N_{r_i}(C_{dr})), & D_r > C_{dr} \\ \text{节点无线发射半径}, & D_r \leq C_{dr} \end{cases} \tag{2}$$

参数 α 能保证当节点连通度满足规定阈值要求时,分簇算法能够挑选出簇内核心密度最高的节点作簇头。图2显示了使用上述权值计算方法,相同连通度、不同节点密度的簇头选择结果。节点A和B的1跳邻居均为7个,即连通度7。当核心节点参数 $C_{dr} = 6$ 时,由于距离节点A最近的7个节点分布更紧凑而被判定为密度更高,被选为簇头。

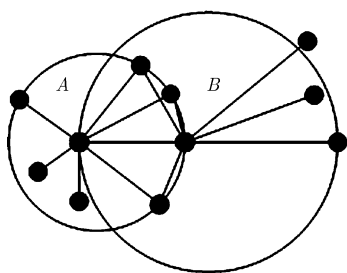


图2 相同连通度不同核心密度下的簇头选择

基于改进DBSCAN的分簇算法具体步骤如下:

(1)获得整个网络的拓扑结构,其中包括所有相邻节点间的测距;(2)使用式(1)所示的权值计算方法,计算每个节点权值;(3)选择网络内权值最大的节点作簇头,从该簇头开始,使用密度可达算法在网络内扩散,簇头密度可达区域即为该簇大小;(4)在整个网络中删除已加入簇的节点,在未加入簇的剩余节点中,重新计算节点权值,并选择其中权值最大的节点作簇头,再次进行密度扩散,产生新的簇,该过程一直持续到没有剩余节点为止;(5)簇合并。把所有簇内成员数小于规定阈值的簇合并到距离最近、且数量大于阈值的簇中去。该合并过程一直进行到所有剩下簇的成员数目大于规定阈值时为止。

2.2 路径规划

本文采用簇头全局路径规划和簇内路径规划相结合方式,首先确定移动信标遍历所有簇的顺序,然后确定簇内信标移动路径,最终形成信标在整个网络内的优化移动路径。

2.2.1 簇头全局路径规划 使用密度分簇算法得到的簇头节点代表了网络高密度区域的分布情况。在进行移动信标路径规划时,需要知道这些簇头的绝对位置。本文采用MDS-MAP(C)^[10]算法对所有簇头进行定位。该算法首先使用最短路径算法构建包含多个移动信标和簇头节点的测距矩阵,然后采用奇异值分解方法得到所有簇头节点的相对坐标。当仅有一个移动信标时,借助信标的移动,可得到多个不共线、具有良好几何拓扑结构的虚拟信标位置(如边长等于无线通信半径的正三角形),由虚拟信标相对

位置与绝对位置间的对应关系,使用最佳线性变换方法,可获得所有簇头相对坐标到绝对坐标的转换矩阵,使用该变换矩阵,得到所有簇头的绝对坐标。

当获得所有簇头的绝对坐标后,本文采用遗传算法^[12]求解信标遍历所有簇头的最短路径,即全局路径规划。定义适应度函数为按染色体顺序遍历所有簇头的路径长度,选择适应度函数值最小的染色体作为路径规划问题的解。由于簇头节点数量相对较少,遗传算法计算复杂度相对较低,可满足传感器网络簇头路径规划实际应用需求。

2.2.2 簇内路径规划 簇头全局路径规划确定了信标遍历整个网络的顺序,而簇内路径规划的目标是在相同的簇内信标移动路径长度条件下,最大化至少3重覆盖区域的面积,以使尽可能多的簇内待定位节点能直接使用3个或更多的虚拟信标信息完成自定位。借鉴蜂窝网络覆盖思想,本文采用正六边形局部路径规划方法,用正六边形包围每一个簇头,簇头位于正六边形中心。与基于等边三角形的局部路径变换方法相比,在相同周长 l (即相同簇内信标移动路径长度)条件下,正六边形围成区域的面积为 $\sqrt{3}l^2/24$,是等边三角形围成面积的1.5倍。

在获得全局簇头遍历路径后,用正六边形替代每个簇头(簇头处于正六边形中心),在正六边形的6个顶点中,选择距离上一个正六边形出口顶点最近的顶点,作为该六边形入口,移动信标按顺时针或反时针方向遍历该正六边形的6个顶点,在最后顶点位置,选择距离该顶点最近的下一个正六边形顶点方向,移动接入下一个正六边形,该步骤一直持续到遍历完所有簇头。移动信标在每个正六边形顶点发射包含自身位置的信息,待定位节点使用接收到的信标信息以及到信标的测距估计实现自定位。

联合使用全局和局部路径规划方法,可生成优化的信标移动路径,在保证定位覆盖度和定位精度前提下,降低移动开销,详见第3节实验。

3 仿真及分析

本节采用图3所示随机非均匀网络拓扑评测算法性能。该正方形边长280 m,其中右下角1/4区域为网络空洞,未部署节点。在正方形网络空洞之外区域随机部署415个节点,网络平均连通度为13。作为对比,本节还实现了基于3阶HILBERT路径的移动信标辅助定位算法。HILBERT路径覆盖整个280 m×280 m区域,总的路径长度为2520 m,路径解析度为40 m,移动信标每隔21 m发射一个信标信息,共发射120个信标。本文假设移动信标的通信半径与待定位节点通信半径相同,均为 $R=25$ m,文中特别指出的例外。

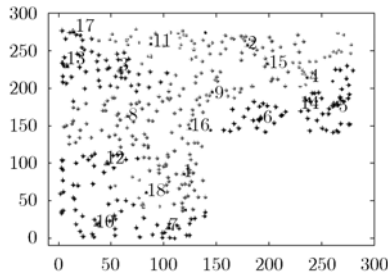


图 3 随机非均匀网络拓扑节点连通图及基于密度分簇结果($R=25\text{m}$)

3.1 分簇有效性

使用本文所提的基于核心密度分簇方法,把图 3 所示密度分布变化较大的网络划分为 18 个簇。每个簇头处于簇内高密度区域,簇内节点密度相近,不同簇的节点密度不同,或空间分隔。

3.2 路径规划

本节首先使用遗传算法对 3.1 节分簇形成的所有簇头进行全局路径规划,然后采用 2.2.2 节介绍的正六边形局部路径规划方法,对簇头及其局部区域进行 3 重覆盖。联合采用全局及局部路径规划方法,对图 3 所示网络进行路径规划得到的移动信标轨迹如图 4 所示。移动信标路径长度为 996 m,仅为 HILBERT 路径长度(2520 m)的 40%左右,有效减少了移动信标能量消耗,缩短了网络完成定位时间。

3.3 定位性能

本节使用图 3 所示网络拓扑评测 MBL(ndc)算法定位性能,并与基于 HILBERT 路径定位方法进行了比较。其中移动信标利用率定义为网络待定位节点接收到的信标数目与移动信标发射总数之比。

表 1 比较了 MBL(ndc)算法与基于 HILBERT 路径算法的定位性能。当节点通信半径为 25 m(对应较粗的路径分辨率)时,MBL(ndc)算法路径长度为 996 m,不到 HILBERT 路径长度的 40%,而定位误差 RMSE 为 20.6%,略优于基于 HILBERT 路径的定位精度(RMSE=21.5%)。从图 5(a)所示定位误差累积分布函数曲线可看出,二者的定位精度比较接近,其中 85%节点定位误差小于 10 m。值得指出的是,MBL(ndc)算法仅需发射 108(18 簇 \times 6 个信

标/簇)个移动信标,明显小于 HILBERT 路径需要发射的信标数量(120 个),有效降低了移动信标的移动和发射开销。由于 MBL(ndc)算法充分利用了网络节点分布信息,仅对节点分布较密的簇头及其附近区域进行路径规划,信标利用率高达 100%,而 HILBERT 路径对整个网络区域全扫描,由于网络部分空洞区域的存在,导致 10%以上的移动信标根本没有被任何定位节点接收到,信标利用率不高。

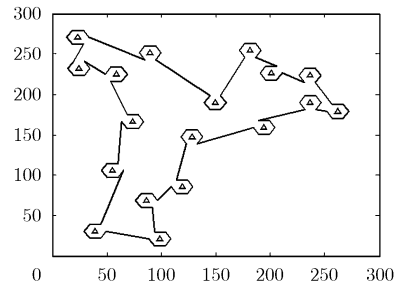


图 4 联合全局和局部路径规划结果

当通信半径增加到 35 m 时(对应一般的路径分辨率),MBL(ndc)算法和 HILBERT 路径的定位精度均得到提高,不过前者定位精度略逊于后者,其原因是随着通信半径的增加,采用 HILBERT 路径,更多的节点可直接接收到信标信息,实现高精度自定位,而采用 MBL(ndc)算法,网络中仍有少量节点基于增量定位方式完成定位。二者对应的定位误差累积分布函数如图 5(b)所示。

表 2 列出了通信半径为 25 m 时 MBL (ndc)算法进行路径规划的时间。可见,路径规划的时间远远小于信标遍历整个路径(996 m)所花的时间。对路径长度进行优化,是提高定位实时性能的关键。

MBL(ndc)算法采用分布式定位计算与集中式路径规划相结合方式。其中路径规划在能够获得全局网络拓扑信息的移动信标或服务器上实现,节点仅进行分布式自定位计算,即簇头及其附近局部区域内的待定位节点直接使用接收到的信标信息,采用三边/多边定位算法实现分布式自定位,其实现复杂度就是普通的三边/多边定位算法复杂度。

表 1 不同发射半径 MBL(ndc)/HILBERT 定位性能比较

发射半径(m)	定位算法	路径长度(m)	信标发射数目	信标利用率(%)	RMSE(%R)	定位覆盖度(%)
25	HILBERT	2520	120	78.3	21.5	75.4
	MBL(ndc)	996	108	100	20.6	77.0
35	HILBERT	2520	120	84	10.5	97.9
	MBL(ndc)	1170	102	100	13.6	95.5

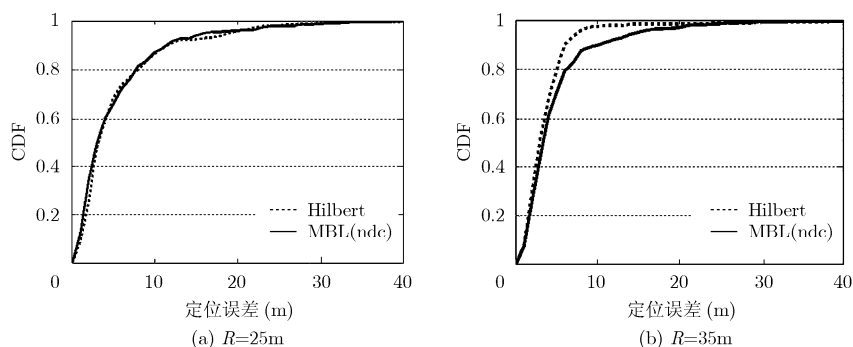


图5 MBL(ndc)/HILBERT 定位误差的累积分布函数比较

表2 MBL(ndc)算法各模块仿真时间

模块	分簇	簇头定位	路径规划
时间(s)	0.19	0.02	0.30

4 总结

本文所提基于网络密度分簇移动信标辅助定位算法可兼顾定位精度、移动信标开销和网络完成定位时间的平衡,可有效减少移动信标的移动路径较长、发射开销,尤其适用于非均匀部署网络。

参考文献

- [1] Sichitiu M L and Ramadurai V. Localization of wireless sensor networks with a mobile beacon. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Fort Lauderdale, Florida, USA, October 24-27, 2004: 174-183.
- [2] Ssu K F, Ou C H, and Jiau H C. Localization with mobile anchor points in wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2005, 54(3): 1187-1197.
- [3] Xia Zhen-jie and Chen Chang-jia. A localization scheme with mobile beacon for wireless sensor networks. Proc. of 6th International Conference on ITS Telecommunications. Chengdu, China, June 21-23, 2006: 1017-1020.
- [4] Kim Kyunghwi and Lee Wonjun. MBAL: A mobile beacon-assisted localization scheme for wireless sensor networks. Proc. of 16th International Conference on Computer Communications and Networks. Honolulu, Hawaii, USA, August, 13-16, 2007: 57-62.
- [5] Lee Sangho, Kim Eunchan, and Kim Chungsan, *et al.* Localization with a mobile beacon based on geometric constraints in wireless sensor networks. Proc. of 3rd International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information. Melbourne, Australia, December 3-6, 2007: 61-65.
- [6] Huang R and Zaruba G V. Static path planning for mobile beacons to localize sensor networks. Proc. of 5th IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops. White Plains, New York, March 19-23, 2007: 323-330.
- [7] Koutsonikolas D, Das S M, and Hu Y C. Path planning of mobile landmarks for localization in wireless sensor networks. *Computer Communications*, 2007, 30(13): 2577-2592.
- [8] Bahi J M, Makhoul A, and Mostefaoui A. Localization and coverage for high density sensor networks. *Computer Communications*, 2008, 31(4): 770-781.
- [9] Ester M, Kriegel H P, and Sander J, *et al.* A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise. Proc. of 2nd Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining. Portland, Oregon, USA, 1996: 226-231.
- [10] Shang Y, Ruml W, and Zhang Y, *et al.* Localization from mere connectivity. Proc. of the 4th ACM Int'l Symp. on Mobile Ad hoc Networking & Computing. Annapolis, Maryland, USA, June 1-3, 2003: 201-212.
- [11] Reino V and Andreas S. TASC: topology adaptive spatial clustering for sensor networks. Proc. of the IEEE Int'l Conf. on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. Washington, DC, November 7-10, 2005, 10 pp.-614.-ISBN: 0-7803-9465-8.
- [12] Grefenstette J J, Gopal R, and Rosmaita B, *et al.* Genetic algorithms for the traveling salesman. Proc. of International Conference of genetic algorithm and their applications. Carnegie-Mellon University, Pittsburgh, Pa, USA, July 24-26, 1985: 359-371.

赵方: 女, 1968年生, 博士, 副教授, 研究领域为计算机网络及分布式计算。

马严: 男, 1955年生, 教授, 博士生导师, 研究领域为IP网络管理和通信软件。

罗海勇: 男, 1967年生, 博士, 高级工程师, 研究方向为无线定位、普适计算及嵌入式系统。

林权: 男, 1984年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络。

林琳: 男, 1984年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络。